中国生态农业学报 2017 年 9 月 第 25 卷 第 9 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Sep. 2017, 25(9): 1351−1359

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.170134

张雪茹, 冯美臣, 杨武德, 王超, 郭小丽, 史超超. 基于光谱变换的低温胁迫下冬小麦叶绿素含量估测研究[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(9): 1351−1359

Zhang X R, Feng M C, Yang W D, Wang C, Guo X L, Shi C C. Using spectral transformation processes to estimate chlorophyll content of winter wheat under low temperature stress[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(9): 1351−1359

基于光谱变换的低温胁迫下冬小麦叶绿素含量估测研究*

张雪茹, 冯美臣**, 杨武德, 王 超, 郭小丽, 史超超

(山西农业大学旱作农业工程研究所 太谷 030801)

摘 要: 近年来, 冻害已成为影响我国冬麦区的农业气象灾害之一, 及时、快速、准确地获取冬小麦叶绿素含量对于监测冬小麦冻害发生具有极其重要的意义。本研究通过低温胁迫试验, 在拔节期对两个冬麦品种进行−6 ℃, 4 h、8 h和 12 h 的胁迫处理后, 测定其冠层光谱反射率, 并对原始光谱数据进行 15 种典型变换处理, 分析比较不同光谱变换下冬小麦叶绿素含量的 PLSR 模型, 筛选出能够表征低温胁迫下冬小麦叶绿素含量的最佳光谱变换方式。结果表明, 随低温胁迫时间的延长, 两个冬小麦品种叶绿素含量呈降低趋势, 随着低温胁迫后天数的增加, 各处理与对照的差异逐渐减小。胁迫后 5 d, 近红外区域反射率有较大升高, 并随低温胁迫后时间的延长而升高; 在可见光区域, 短期内差异不明显。胁迫后 10 d、20 d、35 d, 黄、红波段逐渐趋于水平, 同时近红外区域反射率差异逐渐缩小, 可见光区域光谱反射率出现不同程度的上升。对原始光谱数据进行 15 种典型变换处理, 发现原始光谱的倒数、对数、幂、平方根等变换难以提高与叶绿素含量的相关性, 且建模效果较差。除原始光谱对数的一阶微分(T_6)外, 其他微分变换处理的叶绿素含量诊断模型都优于原始光谱。综合考虑模型的校正、验证效果、模型最佳因子数以及相对分析误差的大小, 二阶微分变换处理(T_{15})叶绿素含量校正模型的 R^2 和 RMSE 分别为 0.930、0.340, 验证模型的 R^2 为 0.753, 表明基于 T_{15} 的光谱变换数据可实现低温胁迫下叶绿素含量的准确估算, 为最佳光谱变换方式。

关键词: 冬小麦; 叶绿素含量; 光谱变换; 低温胁迫; 偏最小二乘法
中图分类号: S512.1+1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2017)09-1351-09

Using spectral transformation processes to estimate chlorophyll content of winter wheat under low temperature stress*

ZHANG Xueru, FENG Meichen**, YANG Wude, WANG Chao, GUO Xiaoli, SHI Chaochao

(Institute of Dry Farming Engineering, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China)

Abstract: Chlorophyll content is a vital index of photosynthetic capacity and crop growth status. In recent years, freeze injury had become a main meteorological disaster at jointing stage of winter wheat in the northern region of China. Although global climate had been warming since the 1980s, freeze injury had not weakened. Climate warming had led to a decline in the pro-

* 国家自然科学基金项目(31201168, 31371572)、山西省科学技术发展计划项目(201603D221037-3)和山西省青年基金项目(20120210235)资助
** 通讯作者: 冯美臣, 主要研究方向为作物生态与信息技术。E-mail: fmc101@163.com
张雪茹, 主要研究方向为作物生态与信息技术。E-mail: m18404980681@163.com
收稿日期: 2017-02-19 接受日期: 2017-05-23

* This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (31201168, 31371572), Shanxi Province Scientific and Technological Development Project (201603D221037-3) and Shanxi Province Young Foundation Projects (20120210235).
** Corresponding author, E-mail: fmc101@163.com
Received Feb. 19, 2017; accepted May 23, 2017

portion of wheat varieties planted in winter and to a rise in the proportion of the varieties planted in spring. With increasing warm autumn years, the issue of wheat overgrowth has worsened, decreasing the ability of wheat to resist cold. Climate change has not been stable and extreme weather events have increased, implying that there was still the risk of freeze injury of wheat. Shanxi Province suffered freeze injury and the maximum area affected by freeze injury has been estimated at 0.26 million hectares. This had a severe impact on the growth and development of wheat, and ultimately affected the yield of wheat. The rapid and accurate estimation of chlorophyll content of winter wheat is meaningful in resisting the occurrence of freeze injury. However, the routine methods of measuring chlorophyll content are complex and time-consuming. Therefore, developing a rapid and non-destructive chlorophyll content diagnosis technology can be an effective way to monitor winter wheat freeze injury. Here, two varieties of winter wheat were treated under −6 ℃ temperature stress for 4, 8 and 12 hours at jointing stage. Moreover, canopy spectra were collected and the raw spectrum transformed with respect to 15 transformation methods and then the spectral transformation processes of chlorophyll content of winter wheat were analyzed in the PLSR model. The aim was to select the optimal spectral transformation of chlorophyll content in winter wheat under low temperature stress, and provide theoretical basis for monitoring freeze injury of winter wheat. The results showed that the chlorophyll content of two winter wheat varieties declined with increasing time of low-temperature stress. With increasing number of days after freeze, the differences between low temperature and control treatments decreased gradually. Moreover, the near-infrared region reflectance increased greatly with strengthening low-temperature stress and the visible region had no significant difference in short-term stress after 5 days. While the yellow and red bands increased, the near-infrared region decreased in differences after 10, 20 and 35 days of stress. Compared with the raw spectrum, the transformation methods under differential treatments (e.g., reciprocal, logarithm, power, and square root transformation methods) failed to improve the relevance of chlorophyll content and therefore the overall performance of model was poor. Other differential transformation processes of chlorophyll content diagnosis models had higher precision than raw spectral analysis, except for T_6 [$(\lg R)'$, R is the spectral reflectance]. Moreover, the second-order differential for raw spectrum (T_{15}, R'') had a higher accuracy (R_C^2 = 0.930, $RMSE_C$ = 0.340; R_V^2 = 0.753) respectively for the calibrated and validated models after comprehensive evaluation of predicted performance and complexity level of different models. It showed that the second-order differential for raw spectrum (T_{15}, R'') was the most plausible transformation method of spectral reflectance for evaluating chlorophyll content of winter wheat under low temperature stress.
Keywords: Winter wheat; Chlorophyll content; Spectral transformation; Low temperature stress; Partial least square regression (PLSR)

叶绿素含量是衡量作物光合能力和生长状况的重要指标。近年来，拔节期冻害已成为影响我国北方冬麦区主要的农业气象灾害[1]。及时、快速、准确地获取冬小麦叶绿素含量对于抵御冬小麦冻害发生具有极其重要的意义。常规的叶绿素含量测定方法操作过程繁琐且耗时费力，因此，开展快速、无损的叶绿素含量诊断技术是实现冬小麦冻害监测的重要举措。

随着遥感技术的出现，不仅可以确定大范围最低温度的时空变化特征，而且可以实现对冻害进行大面积精确的监测和统计[2]。研究表明大尺度遥感监测冻害已取得一定的研究成果[3-8]，但研究所用遥感影像分辨率较低，监测效果很难满足目前的需求[9]。因此，利用地面高光谱成为作物冻害监测的一个重要发展方向。光谱数据变换对消除背景、噪音、异常值、降低内外部环境因子的干扰，以及放大提取光谱吸收特征方面具有明显的效果[10]。梁亮等[11]通过分析18种高光谱指数对叶绿素的估测能力，筛选出最优指数，并用LS-SVR法建立了小麦(*Triticum aestivum* L.)冠层叶绿素含量的预测模型。贺军亮等[12]研究表明，倒数、导数、对数和标准化可以提高光谱与土壤有机质的相关性。Broge等[13]、Wu等[14]和Daughtry等[15]分析了10余种光谱指数与玉米(*Zea mays* L.)、冬小麦等农作物叶绿素含量的相关性，构建了叶绿素含量的估测模型。魏辰阳[16]建立了冬小麦冠层高光谱敏感指标与单株产量要素的回归模型，从而构建了冬小麦晚霜冻害的诊断指标体系。王慧芳等[17]利用主成分分析技术对高光谱数据进行分析，结果表明基于该方法建立的模型能够实现冬小麦冻害严重度反演。任鹏等[18]通过对原始光谱进行一阶微分处理，分析了冬小麦冠层高光谱对低温胁迫的响应特征。岳学军等[19]以117棵甜橙(*Citrus sinensis*)树为研究对象，将不同光谱变换形式在小波去噪后进行偏最小二乘回归建模，发现全生长期叶绿素监测模型精度可达0.871 3。上述学者运用不同的方法对叶绿素含量进行了估测，利用高光谱数据分析光谱变化特征[20]及光谱变换在其他作物及研究领域中已取得了较多的果[21-22]，但将多种光谱变换方法应用于冬小麦低温胁迫的研究较少且不够深入。

本研究拟通过田间小区试验，对拔节期大田冬

小麦进行低温胁迫处理，以叶绿素含量为因变量，通过对原始光谱进行15种变换处理，对比分析不同变换光谱与叶绿素含量的相关性，构建叶绿素含量PLSR模型所需的潜在因子个数及模型精度，综合评价叶绿素含量模型的可行性，筛选出能够准确、快速反演冬小麦叶绿素含量的光谱变换方式，以期为高光谱技术在冬小麦冻害监测方面的应用提供一定的理论依据。

1　材料与方法

1.1　供试材料

试验于 2015 年 10 月至 2016 年 6 月在山西农业大学农业部华北黄土高原地区作物栽培与耕地保育科学观测实验站进行。试验材料为‘临麦 7006’和‘晋太 182’，分别为半冬性品种和冬性品种。

1.2　试验设计

试验分为两个小区，每个小区长和宽均为 6 m，行距为 20 cm，于 2015 年 10 月 2 日播种，常规施肥，田间管理按一般高产田进行。在每个小区内随机选取 3 块长势均匀且一致的冬小麦，并于 2016 年 4 月 15 日至 16 日(拔节期)进行低温胁迫处理(采用定制的可移动式制冷设备，其内部可对自然状态下的降温过程进行模拟)，每个处理的面积为 60 cm×60 cm，处理温度为–6 ℃，处理时间分别为 4 h、8 h 和 12 h，对照测定时大气温度为 15 ℃，重复 3 次。

1.3　冠层光谱测定

利用ASD FieldSpec 3(美国ASD)光谱仪，分别于冬小麦低温胁迫处理后5 d、10 d、20 d和35 d进行冠层光谱反射率的测定。光谱仪350~1 000 nm间的光谱采样间隔为1.4 nm，分辨率为3 nm，1 000~2 500 nm的光谱采样间隔为2 nm，分辨率为10 nm。测量时间为10:00—14:00晴朗无风的天气条件。受大气和周围环境的影响，本文选用350~1 600 nm波段作为研究对象。

测量时，传感器探头始终与地面保持 90°，距离冠层高度大约为 1.2 m，每个处理选 3 个观测点，每个点测量 10 次，取平均值作为该处理的光谱反射率数据，测量中及时进行白板校正(即所得到的目标物光谱反射率是相对反射率)。

1.4　叶绿素含量测定方法

与光谱测量同步，在每个处理的小区内采集冬小麦功能叶，立即装入密封袋中，每个处理重复3次。在实验室内将其剪碎混匀，用80%的丙酮在黑暗条件下浸提24 h，测定663 nm和645 nm处的光密度值，计算叶绿素含量。

1.5　光谱变换方法

在前人研究的基础上，本文选取15种典型的数学变换方法对冬小麦冠层光谱数据进行变换，如表1所示。

表 1　15 种光谱数据变换计算公式

Table 1　Specific algorithm of fifteen spectral transformations

简写 Abbreviation	计算公式 Algorithm	简写 Abbreviation	计算公式 Algorithm	简写 Abbreviation	计算公式 Algorithm	简写 Abbreviation	计算公式 Algorithm
T_0	R	T_4	$\sqrt{R}$	T_8	$\left(\sqrt{R}\right)'$	T_{12}	$(\lg R)''$
T_1	$1/R$	T_5	$(1/R)'$	T_9	R'	T_{13}	R^2
T_2	$\lg R$	T_6	$(\lg R)'$	T_{10}	$(1/\lg R)''$	T_{14}	R^3
T_3	$1/\lg R$	T_7	$(1/\lg R)'$	T_{11}	$\left(\sqrt{R}\right)''$	T_{15}	R''

R 为波段 λ(nm)处的反射率值。R is the spectral reflectance value at the wavelength of λ (nm).

1.6　数据处理与分析方法

1.6.1　建模集与验证集的划分

本文共测定叶绿素含量样本96份，剔除异常值后将该样本按2∶1随机分为两部分，即2/3(64份)数据作为校正集，1/3(32份)作为验证集。

1.6.2　模型的构建与应用

偏最小二乘法(partial least square regression, PLSR)融合了主成分分析和多元线性回归以及相关性分析的优点。模型构建采用留一交叉验证法来确定最佳因子数，PLSR模型的评价选取决定系数(R^2)、均方根误差(RMSE)和相对分析误差(RPD)进行综合评定。R^2和RPD越大，RMSE越小，模型的可行性和稳健性越好[21]。

1.7　统计分析

利用ViewSpec Pro软件进行原始高光谱数据的预处理；利用Excel 2007进行数据变换处理；利用DPS6.5统计分析软件进行方差分析和多重比较；PLS分析采用MatlabR2010a软件进行；利用Origin 8.0软件进行相关数据的处理、分析与制图。

2　结果与分析

2.1　低温胁迫下叶绿素含量的变化规律

通过对低温胁迫后两个冬小麦品种叶绿素含量

的变化分析(图 1)，可以看出，随低温胁迫时间的延长，两个冬小麦品种叶绿素含量呈降低趋势。胁迫后 5 d，'临麦 7006'和'晋太 182'的对照和低温胁迫 12 h 处理均差异显著，其他处理叶绿素含量都低于对照，但差异不显著，说明低温胁迫对叶片叶绿素的合成造成了一定的影响，且胁迫时间长、胁迫后短期内较为明显。整体表现为随着低温胁迫时间的延长，叶绿素含量降低幅度加大。胁迫后 10 d、20 d、35 d，各处理间差异不显著，但随着低温胁迫时间的延长，叶绿素含量与对照相比，差异逐渐缩小，这是由于随着生育期的推进，植株对低温胁迫具有一定的自我修复能力。

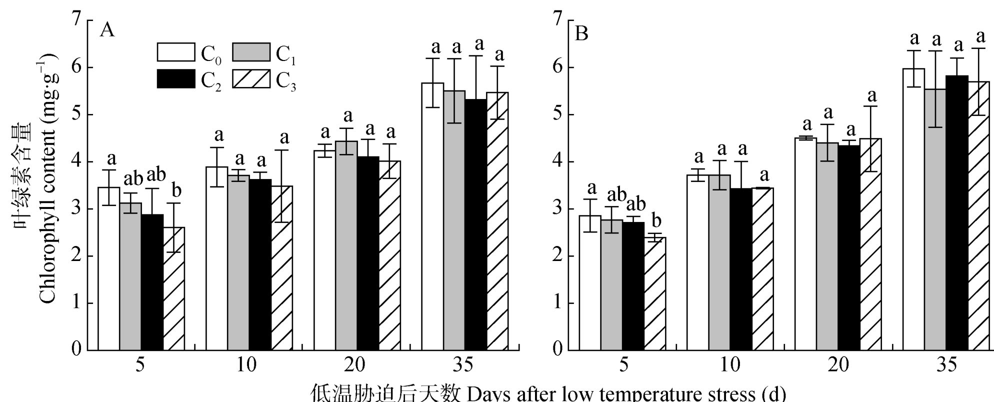


图 1　不同时间低温胁迫后不同天数冬小麦品种'临麦 7006'(A)和'晋太 182'(B)叶绿素含量的变化

Fig. 1　Variations of chlorophyll contents of winter wheat varieties 'Linmai 7006' (A) and 'Jintai 182' (B) in different days after low temperature stress for different times

C_0为对照，C_1、C_2和C_3分别为−6 ℃低温胁迫 4 h、8 h 和 12 h。不同小写字母表示 0.05 水平上差异显著。C_0 represents the control, and C_1, C_2 and C_3 are −6 ℃ low temperature stress for 4 h, 8 h and 12 h, respectively. Different lowercase letters mean significant differences at 0.05 level.

2.2　低温胁迫下冬小麦冠层原始光谱变化特征

图2为低温胁迫后不同冬小麦品种光谱变化特征。从图中可以看出，各处理冠层光谱曲线变化规律基本一致。除低温胁迫后35 d外，其余时期不同处理间冠层光谱反射率差异明显，表现出相同的变化规律。伴随低温持续时间的延长，冬小麦光谱反射率呈现一定的规律性差异变化。胁迫后5 d(图2a)，随胁迫时间的延长，叶绿素含量逐渐降低，导致可见光区域的光谱反射率出现不同程度的上升，胁迫处理12 h(S_3)在绿峰和红谷处达到最高，由于该区域反射率相对较低(0.1以下)，所以处理间差异不明显。但在近红外区域处差异明显，与对照组相比，胁迫后均出现较大幅度抬升，反射率升高，尤其是胁迫处理8 h(S_2)处理反射率最高达0.38。胁迫后10 d(图2b)，可见光区域反射率仍较低。近红外区域差异明显，最高反射率为S_2处理，达0.42。胁迫后20 d(图2c)，可见光区域趋于平缓，红谷不明显，绿峰削弱，反射率仍较低。近红外区域各处理反射率差异缩小，胁迫处理4 h(S_1)处理反射率最高，为0.36，总体较上一时期有所降低。胁迫后35 d，可见光区域趋于平缓，出现红谷抬升的现象，反射率仍较低。近红外区域各处理反射率差异逐渐缩小，说明伴随着生育期的推进，冬小麦出现一定程度的恢复。从图2e-2h看，'晋太182'与'临麦7006'低温胁迫后光谱反射率的变化规律大致相同，但'晋太182'的冠层光谱反射率均高于'临麦7006'。叶绿素含量值的大小与冠层光谱反射率的变化密切相关，在400~700 nm区域，叶绿素a、b等色素对该波段区域的强吸收，致使该区域的反射光和透射光都很低，形成两个吸收谷，当叶绿素含量降低时，反射率增大，难以形成吸收谷。如果仅用原始冠层光谱进行分析，则会影响冬小麦叶绿素含量光谱信息的提取，降低监测模型的精度，因此有必要对冠层光谱进行一定的预处理。

2.3　光谱数据变换后的光谱反射率

利用表1中的数学变换方法对原始光谱数据进行光谱变换处理，结果如图3所示。

从图3可以看出，与原始光谱数据(T_0)相比，光谱变换方法T_2、T_4、T_{13}和T_{14}的曲线特征没有发生明显变化。T_1和T_3的曲线特征发生了明显变化，而T_5、T_6、T_7、T_8、T_9、T_{10}、T_{11}、T_{12}、T_{15}等变换方式则在提高信噪比和细化光谱信息方面效果比较显著。表明微分变换光谱可以消除线性或接近线性噪声的影响，使光谱特征信息表现更为明显。

2.4　叶绿素含量与变换光谱的相关性分析

极端的气象条件(如冻害)致使冬小麦根系无法吸水，严重时细胞内生物膜系统崩溃，叶绿体破裂，

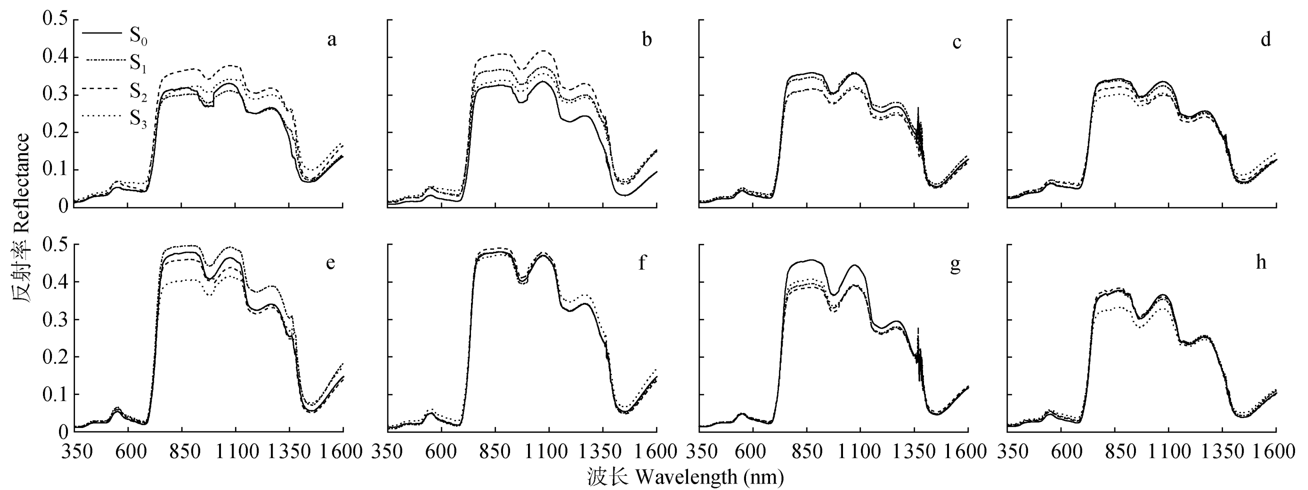


图 2　冬小麦品种'临麦 7006'(a, b, c, d)和'晋太 182'(e, f, g, h)低温胁迫后 5 d(a, e)、10 d(b, f)、20 d(c, g)和 35 d(d, h)的光谱反射率均值变化曲线

Fig. 2　Changes of hyperspectral reflectance curves after 5 days (a, e), 10 days (b, f), 20 days (c, g) and 35 days (d, h) of low temperature stresses for two winter wheat varieties 'Linmai 7006' (a, b, c, d) and 'Jintai 182' (e, f, g, h)

S_0为对照, S_1、S_2和S_3分别表示低温胁迫4 h、8 h和12 h。S_0 represents the control, S_1, S_2 and S_3 are treatments of low temperature stress for 4 h, 8 h and 12 h, respectively.

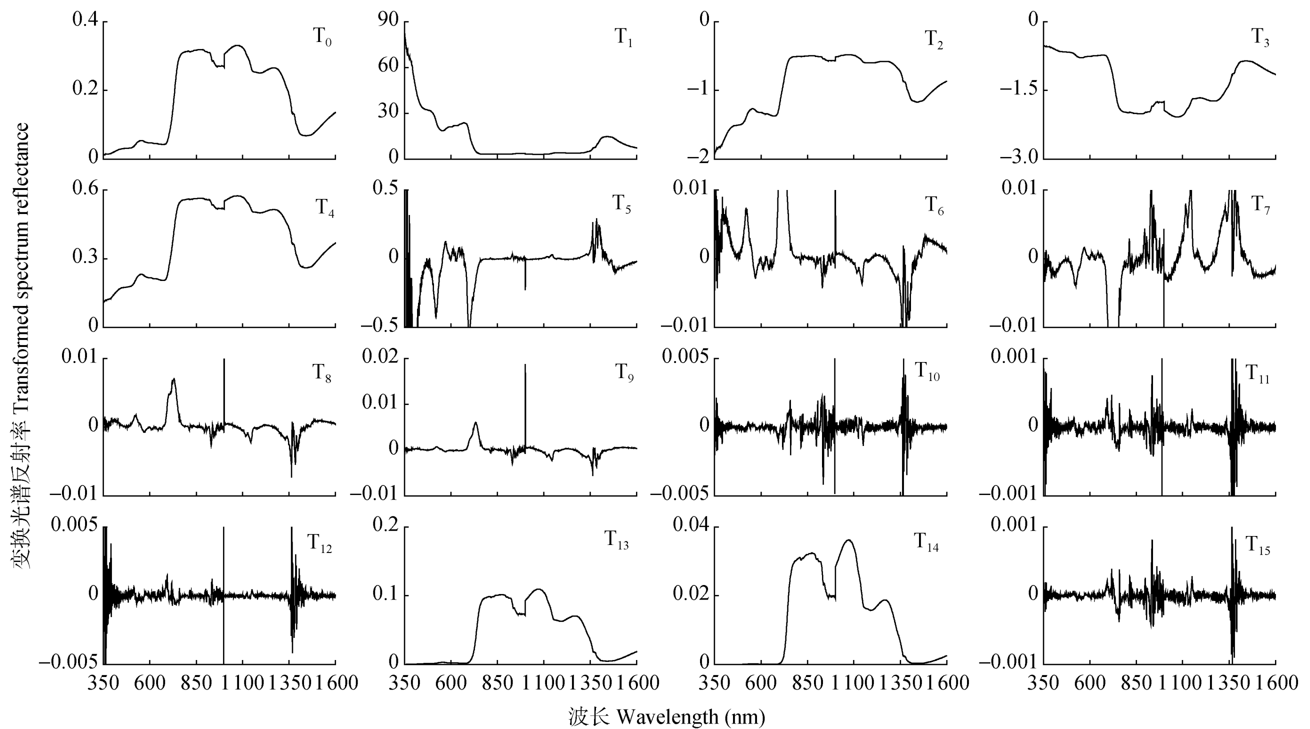


图 3　15 种光谱数据变换方法后的低温胁迫下冬小麦冠层反射率

Fig. 3　Transformed spectral reflectance of fifteen algorithms of winter wheat under low temperature stress

导致叶绿素降解从而使叶绿素含量发生急剧变化[23], 实时监测叶绿素含量的变化对抵御冬小麦冻害具有一定的指导意义。相关性分析法是分析变量之间相关关系的一种可靠方法。通过对低温胁迫后冬小麦光谱变换数据与叶绿素含量进行相关性分析(图 4), 可以看出, 与原始光谱(T_0)相比, T_1、T_2、T_3、T_4、T_{13}和 T_{14} 等变换光谱并没有提高与叶绿素含量的相关性, 而 T_5、T_6、T_7、T_8、T_9、T_{10}、T_{11}、T_{12}和 T_{15} 变换后的光谱则明显提高了与叶绿素含量的相关性, 且与叶绿素含量的相关性均达 0.7 以上。比较图 3 和图 4 可以发现, 变化幅度较大的光谱与叶绿素含量相关性的变化幅度也较大, 相关系数也得到明显提高, 其中微分变换效果较好。表明对原始光谱进行微分变换处理能显著提高与叶绿素含量的相关性。

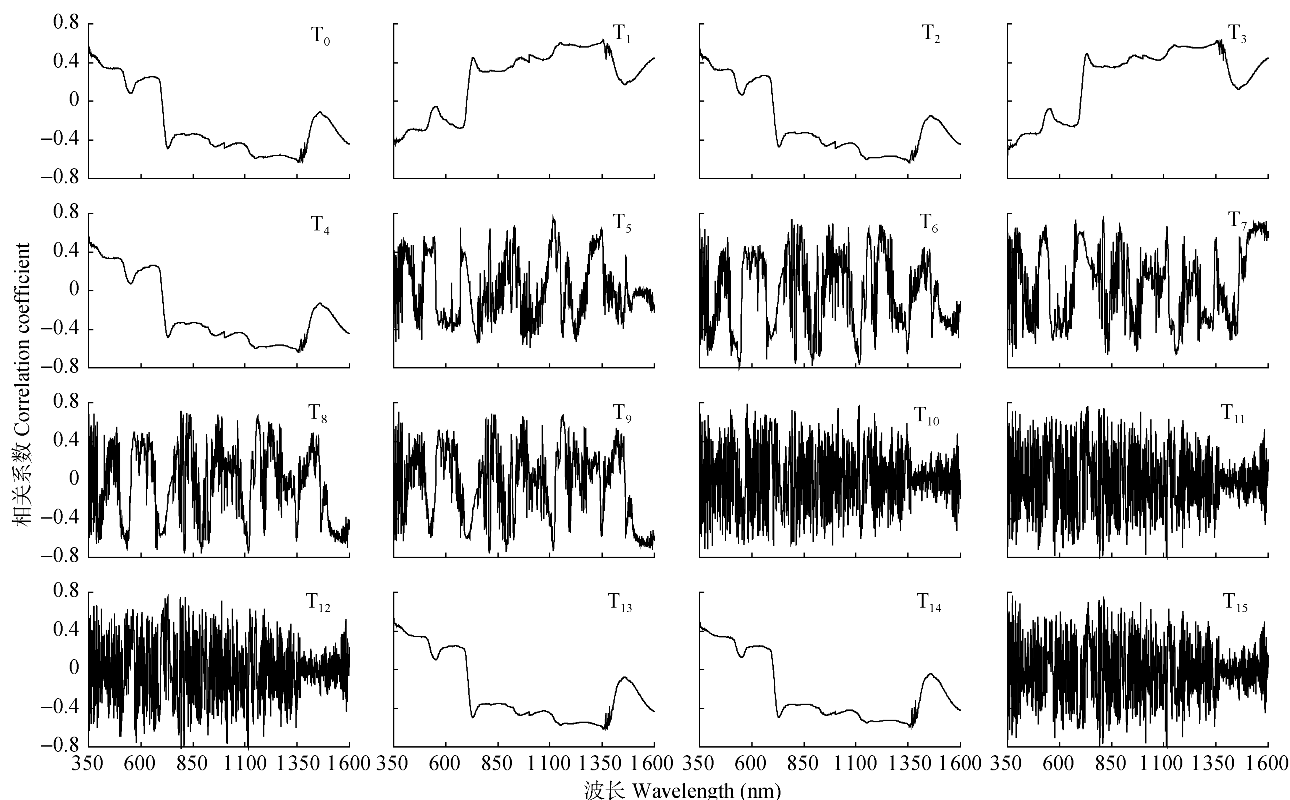


图 4 低温胁迫下冬小麦叶绿素含量与不同变换光谱的相关性分析

Fig. 4 Correlation analysis between different transformed spectral reflectance and chlorophyll content of winter wheat under low temperature stress

2.5 低温胁迫下冬小麦叶绿素含量光谱监测模型

2.5.1 基于 PLSR 模型的最佳因子数确定

分别以冬小麦冠层原始光谱反射率及15种变换方式反射率为自变量，以叶绿素含量为因变量，利用留一交叉验证法来确定回归模型的最佳因子数，如图5所示。选择最佳因子数是准确提取光谱特征信息和构建稳定、精确模型的前提，模型中引入过少或过多的潜在因子，都会影响到模型的预测准确度。因此，本研究以不同光谱变换方式RMSECV变化曲线的平衡点作为最佳因子数，其中，T_0、T_1、T_2、T_3、T_4、T_7、T_9、T_{13}、T_{14}的最佳因子数为4，T_5、T_6、T_{11}、T_{12}的最佳因子数为2，T_8的最佳因子数为5，T_{10}和T_{15}的最佳因子数为3。

2.5.2 基于 PLSR 的冬小麦叶绿素含量估算

利用PLSR法分别对低温胁迫下冬小麦冠层原始光谱及其变换方式进行建模集和验证集的整体回归分析，筛选出最佳光谱变换方式及对应监测模型，结果如表2所示。

在模型精度相近的情况下，模型引入的因变量个数越少，模型的应用价值越高。最佳因子数和相关系数以及RPD也是非常重要的参考指标。由表2可知，不同光谱变换方式对模型的构建和预测有较大的影响，除T_1、T_2、T_3、T_4、T_6和T_{14}外，其他变换方式条件下的冬小麦叶绿素含量监测精度(R^2)均优于原始光谱(R^2=0.776)，说明对原始光谱数据进行一定的变换处理，可以提高低温胁迫下冬小麦叶绿素含量的光谱监测精度。T_8和T_{13}的模型精度虽优于T_0，但其RPD均低于1.4，表明模型的预测能力差。且T_8校正模型引入的最佳因子数较大(F_n=5)，从而增加了冬小麦叶绿素含量监测模型的复杂度，使模型易出现“过拟合”现象；T_{13}与叶绿素含量的相关性也较低，增加了模型的不稳定性。兼顾模型的精确度和复杂度，利用T_5、T_7、T_9、T_{10}、T_{11}、T_{12}和T_{15}等变换处理后的光谱数据，可以优化叶绿素含量监测模型，提高诊断模型的精度。尤其是T_9和T_{15}构建的监测模型，不但精确度较高，而且模型引入的最佳因子数也较少。从整体上看，T_{15}构建的模型精确度、RPD及相关系数均大于T_9，且最佳因子数小于T_9，因此，T_{15}为最佳的光谱数据变换方式。综上所述，利用T_{15}变换方式可提高冻害下冬小麦叶绿素含量诊断精度，是可以考虑的光谱数据变换方法，T_9次之。

3 讨论与结论

叶绿素是影响作物光合作用的主要因子，其含量直接影响作物的代谢及产量形成[24]。本文对低温

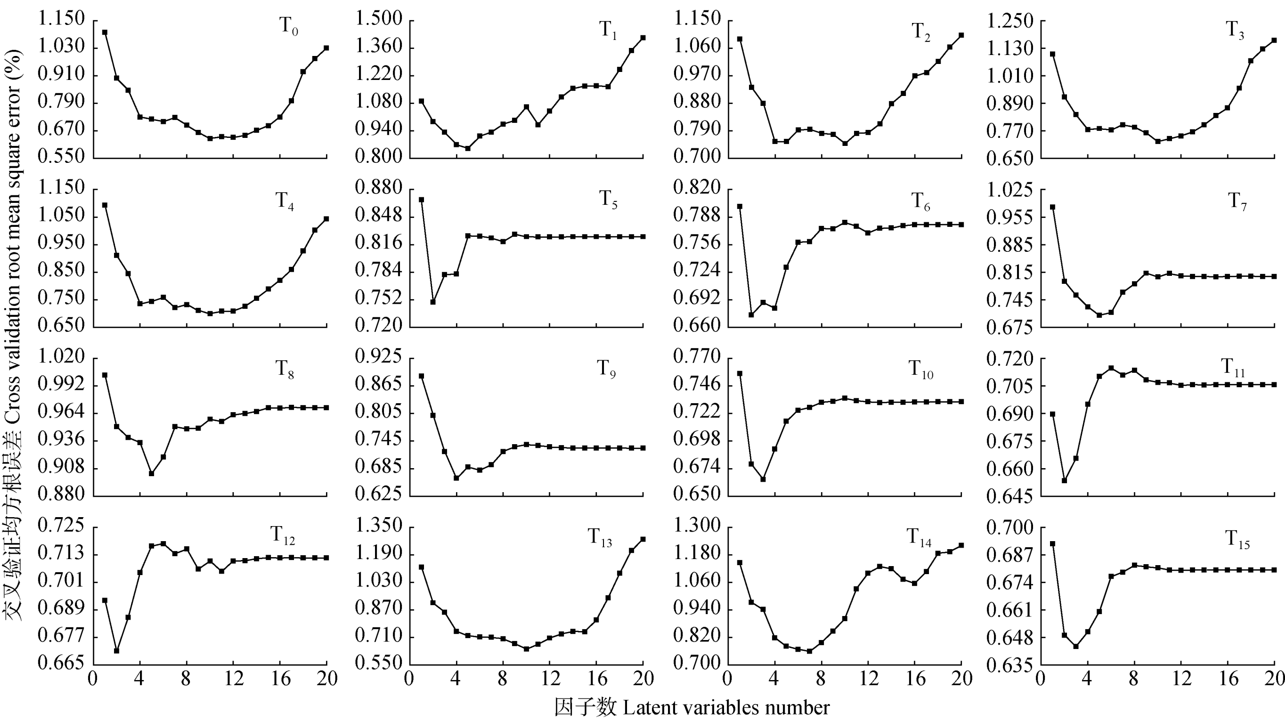


图 5　基于低温胁迫下冬小麦叶绿素含量 **PLSR** 模型的不同光谱变换方式最佳因子数确定

Fig. 5　Plots of cross validation root mean square error (RMSECV) with number of latent variables based on PLSR models for chlorophyll content of winter wheat under low temperature stress with different spectral transformation methods

表 2　低温胁迫下基于不同光谱变换方式的冬小麦叶绿素含量 **PLSR** 模型

Table 2　PLSR model for winter wheat chlorophyll content based on different spectral methods under low temperature stress

光谱变换方式 Spectral transformation method	建模集 Calibration set (n=64)			验证集 Validation set (n=32)			RMSECV	最优因子个数 Optimal latent variable number
	R_C^2	$RMSE_C$	RPD	R_V^2	$RMSE_V$	RPD		
T_0	0.776	0.608	2.130	0.696	0.862	1.105	0.730	4
T_1	0.717	0.683	1.895	0.616	0.710	1.343	0.870	4
T_2	0.758	0.631	2.050	0.718	0.705	1.351	0.755	4
T_3	0.747	0.646	2.003	0.723	0.719	1.325	0.775	4
T_4	0.769	0.617	2.097	0.724	0.758	1.257	0.736	4
T_5	0.841	0.513	2.526	0.689	0.623	1.531	0.749	2
T_6	0.752	0.639	2.024	0.787	0.545	1.747	0.674	2
T_7	0.864	0.473	2.738	0.757	0.654	1.457	0.727	4
T_8	0.942	0.309	4.183	0.705	0.729	1.307	0.691	5
T_9	0.891	0.423	3.059	0.742	0.667	1.428	0.664	4
T_{10}	0.884	0.438	2.958	0.767	0.629	1.514	0.665	3
T_{11}	0.841	0.511	2.531	0.781	0.583	1.635	0.653	2
T_{12}	0.841	0.512	2.529	0.779	0.558	1.707	0.671	2
T_{13}	0.779	0.604	2.145	0.570	1.179	0.808	0.746	4
T_{14}	0.739	0.656	1.974	0.440	1.482	0.643	0.819	4
T_{15}	0.930	0.340	3.807	0.753	0.642	1.483	0.644	3

胁迫下不同冬小麦品种叶绿素含量的变化规律进行分析，发现胁迫后5 d，各处理叶绿素含量都低于对照，且随着低温胁迫时间的延长，叶绿素含量下降比较明显，这是由于低温胁迫后，叶片内部结构遭到破坏，从而导致叶绿素含量下降。胁迫后35 d，胁迫对叶绿素含量的影响逐渐减小，这是作物在遭受胁迫后自身具有一定的自我调节和修复能力[25]，与前人的研究结果[18]一致。不同胁迫下冬小麦的原始光谱曲线变化规律基本一致。胁迫后5 d，可见光区域的光谱反射率出现不同程度的上升，这是由于该

条件下叶绿素含量逐渐降低，从而导致色素对该区域的吸收减弱，反射率升高造成的。在近红外区域处差异明显，与对照组相比，胁迫后均出现较大幅度抬升，反射率升高。胁迫后10 d与20 d光谱变化规律大致相同。胁迫后35 d，可见光区域趋于平缓，出现红谷抬升的现象，近红外区域各处理反射率差异逐渐缩小，是由于伴随着生育期的推进，冬小麦叶绿素含量出现一定程度的恢复，与对照组的差异逐渐减小。

但是仅通过分析冬小麦原始光谱特征很难达到冻害监测的目的，因此，本文利用15种数学变换方法对冬小麦冠层原始光谱数据进行变换处理，通过比较不同变换方式叶绿素含量的PLSR模型精度，选择构建低温胁迫下冬小麦叶绿素含量监测模型的最佳光谱变换方法。研究表明微分处理在降低背景和噪音影响等方面具有重要的作用[26]。本文发现与原始光谱数据(T_0)相比，涉及微分变换的光谱有较大幅度的改变，增加了光谱反射率在波段间的差异性，提高了变换光谱与叶绿素含量的相关性。PLSR方法融合了主成分分析和多元线性回归以及相关性分析的优点[27]，为探究低温胁迫下冬小麦冠层全波段光谱与叶绿素含量的定量关系提供一定的指导途径。从冬小麦叶绿素含量的校正模型和验证结果来看，微分变换处理有助于提高低温胁迫下冬小麦叶绿素含量模型的诊断精度，这与岳学军等[19]、梁爽等[28]的研究结果一致。

王强等[29]研究表明，对原始光谱数据进行一阶微分变换，可以提高模型的表现力。本文发现一阶微分处理的光谱表现较好，但综合考虑叶绿素含量诊断精度、模型复杂度、最佳因子数以及相对分析误差，原始光谱的二阶微分(T_{15})光谱变换处理不仅具有较高的校正精度(R^2=0.930、RMSE=0.340、RPD=3.807)，而且引入模型中的因子变量数也较少(F_n=3)。这可能是由于低温胁迫下冬小麦叶绿素含量易受到品种、气候、栽培管理条件等因素的影响造成的。本研究表明，具有较低相关性的变换光谱在构建冬小麦叶绿素含量诊断模型时，为保证PLSR模型的高精确度，需引入更多的变量因子。而Wold等[30]认为引入过多的因子不仅增加了模型的复杂度，而且容易出现“过拟合”现象，从而降低了模型的应用价值。尽管本研究得出的T_{15}光谱变换处理与低温胁迫下冬小麦叶绿素含量构建的模型具有较高的精度，但模型的构建和检验都是在试验条件下进行的。因此，还有待于对低温胁迫下不同阶段、不同年份、不同地区、不同品种、不同栽培方式的冬小麦叶绿素含量估测做进一步研究，以期实现冬小麦更为精确的冻害监测。

综上研究结果表明：1)与原始光谱相比，没有涉及微分处理的光谱变换(如倒数、对数、幂、平方根等变换方法)难以提高与叶绿素含量的相关性，且建模效果较差。2)原始光谱的二阶微分变换处理(T_{15})模型表现最好，表明基于 T_{15} 的光谱数据变换可实现叶绿素含量的光谱估算。另外，可以考虑将原始光谱的一阶微分(T_9)作为光谱数据变换方法。本研究结果可为叶绿素含量估算和光谱数据预处理提供一定的理论依据与技术参考。

参考文献 References

[1] 慕臣英, 杨晓光, 杨婕, 等. 黄淮海地区不同冬春性小麦抗冻能力及冻害指标Ⅰ. 隆冬期不同冬春性小麦抗冻能力比较[J]. 应用生态学报, 2015, 26(10): 3119–3125
Mu C Y, Yang X G, Yang J, et al. Freezing resistance and injury indices for different cultivars of winter-spring wheat in Huang-Huai-Hai Plain. Ⅰ. Comparison of freezing resistance for different cultivars of winter-spring wheat during mid-winter period[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(10): 3119–3125

[2] 赵春江. 农业遥感研究与应用进展[J]. 农业机械学报, 2014, 45(12): 277–293
Zhao C J. Advances of research and application in remote sensing for agriculture[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(12): 277–293

[3] Price J C. Land surface temperature measurements from the split window channels of the NOAA 7advanced very high resolution radiometer[J]. Journal of Geophysical Research, 1984, 89(D5): 7231–7237

[4] Becker F, Li Z L. Towards a local split window method over land surfaces[J]. International Journal of Remote Sensing, 1990, 11(3): 369–393

[5] Prata A J, Platt C M R. Land surface temperature measurements from the AVHRR[C]//Proceedings of 5th AVHRR Data Users Conference. Tromso, Norway: EUMETSAT, 1991: 433–438

[6] Ulivieri C, Castronuovo M M, Francioni R, et al. A split window algorithm for estimating land surface temperature from satellites[J]. Advances in Space Research, 1994, 14(3): 59–65

[7] Kerdiles H, Grondona M, Rodriguez R, et al. Frost mapping using NOAA AVHRR data in the Pampean region, Argentina[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1996, 79(3): 157–182

[8] Jurgens C. The modified normalized difference vegetation index (mNDVI), a new index to determine frost damages in agriculture based on Landsat TM data[J]. International Journal of Remote Sensing, 1997, 18(17): 3583–3594

[9] 冯美臣, 王超, 杨武德, 等. 农作物冷冻害遥感监测研究进展[J]. 山西农业大学学报: 自然科学版, 2014, 34(4):

296–300
Feng M C, Wang C, Yang W D, et al. Progress of remote sensing monitoring crop chilling and freeze injury[J]. Journal of Shanxi Agricultural University: Nature Science Edition, 2014, 34(4): 296–300
[10] 王磊, 白由路, 卢艳丽, 等. 光谱数据变换对玉米氮素含量反演精度的影响[J]. 遥感技术与应用, 2011, 26(2): 220–225
Wang L, Bai Y L, Lu Y L, et al. Effect on retrieval precision for corn N content by spectrum data transformation[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2011, 26(2): 220–225
[11] 梁亮, 杨敏华, 张连蓬, 等. 基于 SVR 算法的小麦冠层叶绿素含量高光谱反演[J]. 农业工程学报, 2012, 28(20): 162–171
Liang L, Yang M H, Zhang L P, et al. Chlorophyll content inversion with hyperspectral technology for wheat canopy based on support vector regression algorithm[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(20): 162–171
[12] 贺军亮, 蒋建军, 周生路, 等. 土壤有机质含量的高光谱特性及其反演[J]. 中国农业科学, 2007, 40(3): 638–643
He J L, Jiang J J, Zhou S L, et al. The hyperspectral characteristics and retrieval of soil organic matter content[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2007, 40(3): 638–643
[13] Broge N H, Mortensen J V. Deriving green crop area index and canopy chlorophyll density of winter wheat from spectral reflectance data[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 81(1): 45–57
[14] Wu C Y, Niu Z, Tang Q, et al. Estimating chlorophyll content from hyperspectral vegetation indices: Modeling and validation[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2008, 148(8/9): 1230–1241
[15] Daughtry C S T, Walthall C L, Kim M S, et al. Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance[J]. Remote Sensing of Environment, 2000, 74(2): 229–239
[16] 魏辰阳. 基于高光谱遥感技术的冬小麦晚霜冻害早期诊断研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2013
Wei C Y. Diagnosis study on later spring frost of winter wheat based on hyperspectral remote sensing[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2013
[17] 王慧芳, 王纪华, 董莹莹, 等. 冬小麦冻害胁迫高光谱分析与冻害严重度反演[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(5): 1357–1361
Wang H F, Wang J H, Dong Y Y, et al. Monitoring freeze stress levels on winter wheat from hyperspectral reflectance data using principal component analysis[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34(5): 1357–1361
[18] 任鹏, 冯美臣, 杨武德, 等. 冬小麦冠层高光谱对低温胁迫的响应特征[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(9): 2490–2494
Ren P, Feng M C, Yang W D, et al. Response of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) hyperspectral characteristics to low temperature stress[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34(9): 2490–2494
[19] 岳学军, 全东平, 洪添胜, 等. 柑橘叶片叶绿素含量高光谱无损检测模型[J]. 农业工程学报, 2015, 31(1): 294–302
Yue X J, Quan D P, Hong T S, et al. Non-destructive hyperspectral measurement model of chlorophyll content for citrus leaves[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(1): 294–302
[20] 熊勤学, 王晓玲, 王有宁. 小麦渍害光谱特征分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(8): 2558–2561
Xiong Q X, Wang X L, Wang Y N. Spectral characteristics analysis of wheat damaged by subsurface waterlogging[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2016, 36(8): 2558–2561
[21] 李岚涛, 汪善勤, 任涛, 等. 基于高光谱的冬油菜叶片磷含量诊断模型[J]. 农业工程学报, 2016, 32(14): 209–218
Li L T, Wang S Q, Ren T, et al. Evaluating models of leaf phosphorus content of winter oilseed rape based on hyperspectral data[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(14): 209–218
[22] 乔星星, 冯美臣, 杨武德, 等. 变换光谱数据对土壤氮素 PLSR 模型的影响研究[J]. 地球信息科学学报, 2016, 18(8): 1123–1132
Qiao X X, Feng M C, Yang W D, et al. Effect of spectral transformation processes on the PLSR models of soil nitrogen[J]. Journal of Geo-Information Science, 2016, 18(8): 1123–1132
[23] 张冬强, 唐子立, 杨勇, 等. 用于监测柑橘叶片冻害的叶绿素含量光谱反射模型研究[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(10): 1891–1896
Zhang D Q, Tang Z L, Yang Y, et al. Model for citrus leaves chlorophyll content based on spectral signature[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2012, 31(10): 1891–1896
[24] Blackburn G A, Ferwerda J G. Retrieval of chlorophyll concentration from leaf reflectance spectra using wavelet analysis[J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(4): 1614–1632
[25] 潘瑞炽. 植物生理学[M]. 第 5 版. 北京: 高等教育出版社, 2004
Pan R C. Plant Physiology[M]. 5th ed. Beijing: Higher Education Press, 2004
[26] Zornoza R, Guerrero C, Mataix-Solera J, et al. Near infrared spectroscopy for determination of various physical, chemical and biochemical properties in Mediterranean soils[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2008, 40(7): 1923–1930
[27] 王镇浦, 周国华, 罗国安. 偏最小二乘法(PLS)及其在分析化学中的应用[J]. 分析化学, 1989, 17(7): 662–669
Wang Z P, Zhou G H, Luo G A. Partial least squares method (PLS) and its application in analytical chemistry[J]. Analytical Chemistry, 1989, 17(7): 662–669
[28] 梁爽, 赵庚星, 朱西存. 苹果树叶片叶绿素含量高光谱估测模型研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(5): 1367–1370
Liang S, Zhao G X, Zhu X C. Hyperspectral estimation models of chlorophyll content in apple leaves[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012, 32(5): 1367–1370
[29] 王强, 易秋香, 包安明, 等. 基于高光谱反射率的棉花冠层叶绿素密度估算[J]. 农业工程学报, 2012, 28(15): 125–132
Wang Q, Yi Q X, Bao A M, et al. Estimating chlorophyll density of cotton canopy by hyperspectral reflectance[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(15): 125–132
[30] Wold S, Sjöström M, Eriksson L. PLS-regression: A basic tool of chemometrics[J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 2001, 58(2): 109–130